

令和元年6月14日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04890

研究課題名(和文) 土壌有機炭素の各種安定化機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of various stabilization mechanisms of soil organic carbon

研究代表者

渡邊 彰 (Watanabe, Akira)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：50231098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：水田土壌における土壌有機炭素(SOC)、畑に施用された厩肥とバイオ炭の中長期的な安定化の機構および火山灰による黒色腐植物質の生成を明らかにすることを目的とした。長期水田利用は、マクロ団粒へのSOCの蓄積を促すが、その際鉱物結合型SOCとともに易分解性Cも増えることが明らかになった。29年の厩肥連用期間中に、SOCの構造的あるいは蓄積形態の変化による安定性の増大は認められなかった。バイオ炭は施用5～7年後に33～89%が残存しており、一部に粘土との結合による安定化が認められた。火山灰と腐植化度が低いフミン酸との培養では、60°Cにおいて黒色度の増大とともに縮合芳香環含量の増大が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌の長期水田利用は、マクロ団粒に安定な形態でCを蓄積し、微生物のエネルギー源になりうるC量も増えることを示唆した。畑土壌に厩肥を連用しても長期的に安定なCは形成されないことを明らかにし、C量を維持するには施用し続けるしかないことを示唆した。土壌施用後のバイオ炭Cの残留性には、バイオ炭の生分解性の違いよりも、鉱物への吸着や気候条件の方が重要である可能性を示した。火山灰存在下でのフミン酸の腐植化度の増大が、縮合芳香環含量の増大を伴うことを示した。また、常温においてもポリフェノールから縮合芳香環を含むフミン酸が形成することを示唆した。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the stabilization mechanisms of soil organic C (SOC) in paddy soils and those for cattle manure (CM) and biochar in upland fields as well as to confirm the formation of black humic acids (HAs) owing to volcanic ash were aimed. Progression of simultaneous accumulation of SOC with enhanced stability in terms of C structure and adsorption to clay minerals and labile SOC were found in macro aggregates in paddy soils. Analyses of the archib soil samples from CM applied soils did not indicate an enhancement in the stability of SOC in terms of chemical structure and accumulation form. Biochar equivalent to 33-89% of the initial amount was maintained 5-7 years after application(s) and up to 20% was stabilized by binding to clay minerals. Incubation of Type Rp HAs with volcanic ash at 40-60°C, respectively, increased degree of humification with a larger extent at a higher temperature. The increase in condensed aromatic structures was also suggested for those incubated at 60°C.

研究分野：土壌圏物質循環学

キーワード：土壌学 土壌圏現象 炭素循環 環境 地球温暖化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策のひとつとして、植物が大気から固定した炭素(C)をより多く土壌に貯留させるための取り組みが推奨されている。土壌C貯留量を増大させるには、土壌への有機C供給量(インプット)を増やすだけでなく、加えたCが土壌中に長く滞留する(アウトプットを減らす)ことが重要である。土壌中Cの安定化機構には、微小団粒内への取り込み、土壌鉱物への吸着、難分解性有機物への構造変化(腐植化の進行、炭化)等があり、これらの機構に合致することで効率的にC貯留量の増大を図ることができると考えられる。

畑地と比較してSOC貯留量が高い栽培体系として水田が挙げられる。その理由は、一般的に湛水に伴う微生物によるSOC分解の抑制と考えられているが、分解を免れたSOCが何れかの機構によって安定化するかどうかは不明である。Nakahara et al. (2016)は、中国で5~2000年間水田として連用されてきた圃場土壌中のSOCの違いを、シルト/粘土結合型SOCに着目して詳細に調べ、同型SOC量が水田連用年数の増大に伴って増大することを確認した。しかし、同型SOC中のフミン酸の黒色度、ヒューミンの¹⁴C年代、¹³C NMRに基づく構造特性、培養試験におけるCO₂生成速度等の分析結果からは、SOCの構造的安定性の増大や粘土鉱物への吸着による安定性の増大は起こっていないと推定された。一方、Zou et al. (2015)は、団粒分析の結果から、水田連用年数が長くなるとマクロ団粒中のSOC含量が増大することを見出したが、その原因は分かっていない。

畑土壌の場合、C貯留量を増やすには、不耕起や作物残さの還元だけでは不十分であり、系外からの有機物の持ち込みが必要である。農地に施用される一般的な有機物は堆肥であるが、それらの分解速度は大きい。名大附属農場で継続している有機物連用試験では、堆肥の多施用により連続的にSOC量が増大したが、施用量を1/2に減らしたところ、急激にSOC量が減少し、効果が持続しないことが示された(渡邊・眞家, 2018)。しかし、堆肥由来Cの減少速度は有機成分間で様ではないと予想されるため、選択的に残存するCの存在を確認することが重要と考えられる。また、有機物は燃焼によって炭化すると環境中で分解されにくくなるため、植物残さ等を高温処理し、炭化物(バイオ炭)に変換した後、土壌に投入する方法が注目されている。バイオ炭の分解性は主に調製温度に依存するが、土壌との混合培養を1年以上行くと、分解速度のパターンが大きく変化する試料が観察される。そのため、無機成分の溶出、酸化、部分分解による構造変化が炭化物Cの動態に影響している可能性が予想されるが、農耕地へのバイオ炭の施用に関する長期的な試験結果は世界的にまだ報告されていない。

好気的な自然土壌の中で黒ボク土は特にSOC含量が高い。その要因として腐植物質の中で構造的に最も難分解性と考えられる黒色フミン酸(A型)の集積が挙げられるが、黒色フミン酸の生成機構は分かっていない。仮説には、火山灰成分の触媒作用によるポリフェノールの縮重合説(熊田, 1981)、草本植生を維持するための火入れで生成した炭化物の酸化分解説(Shindo, 1992)があるが、どちらも分子レベルでの確認はなされておらず、長く検証が待たれている。

2. 研究の目的

本研究は、SOC含量が高いあるいは経時的に増加する可能性がある栽培体系や土壌生成過程におけるCの安定化機構、および農地に施用された有機質資材の安定化機構を明らかにし、SOC貯留量の拡大に寄与することを目的とする。具体的には、(1)連用年数が異なる水田土壌中の耐水性団粒の分析に基づく長期水田利用によるSOCの蓄積機構、(2)堆肥連用畑土壌SOCの物理分画と化学分析に基づく堆肥由来SOCの安定化機構、(3)バイオ炭施用数年後の土壌の分析に基づく炭化物の蓄積形態の経時変化、(4)室内培養実験に基づく火山灰の触媒作用による難分解性黒色フミン酸の生成、を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 長期水田利用によるSOC蓄積機構の解析

中国浙江省上虞市に分布する推定水田利用歴30、100、300、1000、2000年(Zou et al., 2015)の各3圃場から採取した作土(以下SY30、SY100、SY300、SY1000、SY2000と表記する)を用いた。Zou et al. (2015)の方法にしたがって、水中篩別法により500~2,000、250~500、53~250、<53 μmの耐水性団粒4画分を得、乾燥後、重量と全C含量を測定した。また、同様に分画した試料を室温で最大容水量の60%をやや下回るまで乾燥させ、生分解性試験に供した。

生分解性試験: 30 mL容GCバイアルにSY30、SY300、SY1000、SY2000の未分画土壌または各団粒画分3gを加え、最大容水量の60%となるように滅菌水で調整後、気相を合成空気(CO₂<1 ppmv)で置換し、30°Cで91日間暗所培養した(3連)。培養期間中、経時的に気相中のCO₂濃度をTCD-GCを用いて測定した。また、SY2000各画分については、併せて最大容水量の100%、気相をN₂置換した培養試験も行った。さらに、団粒分画操作がSOCの無機化速度に与える影響を確認するために、SY300をいったん分画後、再混合して培養実験を行い、未処理土壌とCO₂生成速度を比較した。

SOCの蓄積形態: 乾燥後粉碎(<0.5 mm)したSY30、SY100、SY300、SY1000、SY2000の未分画土壌とSY30、SY2000の団粒画分について、HF-HCl処理を行ってC濃度を上げた後、PASS法(Ikeya and Watanabe, 2016)を用いてramp ¹³C CPMAS NMRスペクトルを測定した。また、乾燥したSY30およびSY2000の未分画土壌および団粒画分を、ポリタングステン酸ナトリウム(SPT)溶液を用いた重液処理によって、遊離型(比重<1.6)、ガラスビーズととも

に振盪し団粒を破壊することで遊離（比重<1.6）となる団粒内隔離型（以下隔離型）および比重1.6~2.0、比重>2.0の有機物/鉱物比が異なる2種の結合型SOC（以下弱結合型、強結合型）の4画分に分画し、重量とC含量を測定した。

(2) 厩肥由来SOCの安定化の解析

名大附属農場有機物連用試験圃場開設時および厩肥多施用区（牛糞完熟堆肥400 t ha⁻¹ y⁻¹（0~19年目）、200 t ha⁻¹ y⁻¹（19~27年目）施用）および慣行区（牛糞完熟堆肥40 t ha⁻¹ y⁻¹を化学肥料とともに施用）から経時的に採取、保管されてきた風乾土壌計20試料を用いた。粉碎（<0.5 mm）した土壌をHF-HCl処理後、ramp ¹³C CPMAS NMR スペクトルを測定し、各官能基C量の変化を解析した。また、元素分析計-同位体質量分析計を用いて、各土壌のδ¹⁵Nを測定した。δ¹⁵Nは、厩肥、2 M KClを加えた振盪抽出による無機態N除去後の土壌および対照区となる無肥料区、化学肥料区の土壌についても測定した。

また、連用開始時と両処理区各7試料（<2 mm）を用いて、(1)と同じ操作により、比重分画を行い、重量とC含量を測定した。0、13、26年目土壌については、分画回数を増やして、各画分を調製し、厩肥試料とともにPASS法を用いた¹³C CPMAS NMR スペクトルの測定および熱的支援加水分解およびメチル化（THM）-GC/MS（Ikeya et al., 2004）による有機成分組成分析を行った。

(3) 土壌中におけるバイオ炭Cの変化

以下の3グループの土壌試料を用いた：2010年から3年5作の間竹炭（閉鎖系の燃焼窯において700~800°Cで25時間加熱；20 t ha⁻¹）と牛糞堆肥を施用または2012年に2作竹炭（20 t ha⁻¹）を施用した愛知県大府市の野菜（冬作：ブロッコリー、夏作：サツマイモ、カボチャ、青梗菜）畑（Watanabe et al., 2014）から2016年6月に採取した0~15 cm深土壌、2010年にバガス炭（700°Cで0.2時間加熱；60 t ha⁻¹）と牛糞堆肥を施用した沖縄県宮古島市のサトウキビ畑、ニンニク畑、カボチャ畑から2016年6月に採取した0~15 cm深土壌およびサトウキビ畑0~1.5 cm深土壌、2010、2011年に木材チップ炭（700~800°C加熱；20 t ha⁻¹）と食品廃棄物または木材チップ炭（20 t ha⁻¹）と化学肥料を施用した東京都西多摩郡のハウレンソウ畑から2018年5月に採取した0~15 cm深土壌。各土壌試料は風乾後、篩別（<2 mm）し、植物片をピンセットで除去した。

各土壌の全C含量、ブラックカーボン（BC）含量、遊離型炭化物含量を測定した。BC含量は、Borodowski et al.（2005）のベンゼンポリカルボン酸（BPCA）法を一部改変して用いた。遊離型炭化物含量は、比重1.6のSPT溶液を用いて回収し、水洗、80°Cで一晩乾燥後、一部について実体顕微鏡を用いて植物遺体を除き（3連）、重量とC含量を測定することで求めた。また、大府および宮古島土壌については、遊離型炭化物を分離した残渣土壌を、46% HF-12 M HCl溶液（1:1, v/v）を加え、200°Cで加熱処理する操作を2回行って結合型炭化物を粘土鉱物から分離し、再度重液処理を行うことで回収、定量した。

(4) 火山灰の触媒作用による黒色腐植物質の生成

30 mL容褐色バイアル瓶に0.5 mmの篩に通した新鮮な桜島火山灰10 gとNAGOYA法（Ikeya and Watanabe, 2003）にしたがって調製した安城Rp型フミン酸粉末60 mg（31.2 mg C相当）を加えて混合し、滅菌水を最大容水量となるように加え、40、50、60°Cで最大36ヶ月間恒温培養した。その間、水分含量を維持するために1週間ごとに滅菌水を添加した。1、6、24、36ヶ月目に、3連で回収し、凍結乾燥後、全C含量を測定した。火山灰の代わりに石英砂を加えた処理区も用意した（6、24ヶ月）。回収した試料からNAGOYA法にしたがってフミン酸、フルボ酸画分を分離し、C収量と黒色度（フミン酸のみ）を測定した。1、24、36ヶ月培養した火山灰については別途試料量を増やしてフミン酸の精製を行い、¹³C CP/PASS NMR スペクトルを測定した。また、24ヶ月培養した火山灰から調製したフミン酸については、Ikeya et al.（2007）にしたがって酸化ルテニウム酸化分解（RTO）を行い、縮合芳香環の分解生成物であるベンゼンポリカルボン酸類をジアゾメタンでメチル化後に、FID-GCにより内部標準法を用いて定量した。また、フィルター滅菌した0.1 M ピロガロール、0.1 M フロログルシノール溶液と火山灰をpH 6、暗所25°Cで1週間反応させ、NAGOYA法にしたがってフミン酸画分の粉末試料を得、黒色度の測定とRTOによる縮合芳香環測定を行った。

4. 研究成果

(1) 長期水田利用によるSOC蓄積機構

未分画土壌の全C含量は推定水田利用年数の増大と対応して増大する傾向が確認された。団粒分画では、<53 μm画分から53~250 μm画分、次いでより大きな画分への遷移が示され、100年以内に<53 μm画分へのC蓄積量が減少し、300~1000年で>53 μm画分へのC蓄積量が増大することが示唆された。C含量はサイズが大きい画分ほど大きい傾向があり、マクロ団粒（250~500 μmおよび500~2000 μm画分）のC含量は長期水田利用によって増大することはなかったが、重量比が増大することで1000年以降のC蓄積量の増大に寄与していることが示された。

¹³C CP/PASS NMR スペクトルから推定したC組成は、未分画土壌においては、水田連用年数の増大に伴う一方向的な変化は認められなかった。団粒画分においては、サイズが大きい画分

ほどアルキル C が少なく、*o*-アルキル C、芳香族 C が多く、特に 500~2000 μm 画分は分解の進んでいない植物残渣由来の腐植の割合が大きいことが推察された。また、SY2000 では SY30 よりも、500 μm 以下の 3 画分でアルキル C およびカルボキシ C が多く蓄積していることが示された。比重分画において、遊離型 SOC は、< 53 μm 画分からは検出されず、団粒サイズが大きくなるにつれて収量が増大した。水田利用年数の増大に対応する C 蓄積量の増大は、強結合型 SOC においてもっとも顕著であった。250~500 μm 画分および 500~2000 μm 画分では、SY2000 土壤の方が遊離型 SOC の割合が小さく、強結合型 SOC の割合が大きい傾向が認められた。これらの結果からは、推定水田利用年数の長い土壤の方が分解され難い有機物の割合が大きいことが推察された。

団粒画分の CO_2 生成速度も、団粒サイズが大きいほど大きい傾向を示した。しかしながら、< 53 μm 画分と 500~2000 μm 画分の CO_2 生成速度は推定水田利用年数の異なる土壤間で類似しており、53~250 μm 画分と 250~500 μm 画分ではむしろ推定水田利用年数の長い土壤の方が CO_2 生成量、C 減少率が大きかったため、SOC の構造と蓄積形態から推定した安定性の大小と一致しなかった。したがって、250~500 μm 画分への SOC 蓄積量の増大では易分解性 C も併せて増加したと考えられた。ただし、 CO_2 生成速度の差が SOC の差によるものではなく、微生物数の違いに起因している可能性も残されており、今後の検証課題である。なお、好気条件と嫌気条件の間で CO_2 生成速度に明確な差はなかったため、好気条件による培養試験の結果は湛水期間中の SOC 分解速度の異同も反映していると考えられた。また、培養期間中の積算 CO_2 生成量に C 分配率を掛けて足し合わせたものを未分画土壤の積算 CO_2 生成量と比較すると約 2 倍高かったため、いったん分画した土壤を混合し、培養試験を行った結果、やはり未分画土壤よりも CO_2 生成量が有意に大きかった。このことより、サイズの異なる耐水性団粒間の相互作用や配置が、各団粒中の SOC の分解性以上に SOC の保護に重要であることが新たに示された。

(2) 厩肥由来 SOC の安定化

慣行区土壤の全 C 含量は、0 年目から 4 年目にかけて増大した後はほぼ一定であり、厩肥区土壤の全 C 含量は、連用年数が増大するにつれて増大したが、厩肥施用量が半減した 19 年目以降はそれまでの増加速度を上回る速度で減少した。この間、 ^{13}C NMR スペクトルパターンに経時的な変動は認められたものの、開設時からあるいは厩肥施用量を変えた後に連続的に増大もしくは減少する官能基 C は認められず、選択的な残存や土壤中での変換により特定の C の蓄積が進むことはないことが明らかになった。

比重分画では、まず、開設 5 日目土壤の分析より、慣行区、厩肥区とも施用直後には厩肥由来有機物のほとんどがいったん遊離型に分画されることが確認された。慣行区では、連用初期の全 C 含量の増大は遊離型および隔離型 SOC の蓄積によるものであり、それらの平均滞留時間が短いために、5 年目以降は見かけ上変化がなかったと推察された。また、慣行量の厩肥を与え続けても結合型 SOC 量を増大させることはできなかった。しかし、 $\delta^{15}\text{N}$ の変化は、全 C、全 N 含量の増大が止まった以降も厩肥由来 N の蓄積が継続しており、結合型画分中の N の一部も厩肥由来 N に置換されていたことを示唆した。厩肥区においても遊離型 SOC、隔離型 SOC の蓄積が先行したが、その後、それらの一部が弱結合型 SOC に移行するように減少に転じた。弱結合型 SOC の顕著な増大は 9 年目以降に観察されており、遊離型、隔離型 SOC の蓄積量が少ない慣行区では、それらが結合型となる以前に分解されていた可能性が推察された。しかし、厩肥施用量半減後は、まず遊離型 SOC、次いで弱結合型 SOC が減少し、弱結合型 SOC の形成が安定性の増大を表していないことを示唆した。一方、強結合型 SOC 量は変化がなく、安定な C プールを形成していることが示されたが、厩肥多施用下でも増えることはなかった。

強結合型 SOC は、 ^{13}C CP/PASS NMR 分析で芳香族 C が少なく、アルキル C が多かったこと、メチル化熱分解 GC/MS 分析でリグニン由来化合物の割合が小さく、N 化合物の割合が大きかったことから、微生物体を経由した C を多く含むと推察された。メチル化熱分解 GC/MS 分析では、未分画土壤と各団粒画分から直鎖脂肪酸、ジカルボン酸等脂肪族化合物類 73 種、リグニンフェノール、ベンゼンカルボン酸等芳香族化合物類 49 種、複素環式化合物他 N 化合物類 18 種が検出され、それらの収量より、厩肥および遊離型 SOC > 未分画土壤、隔離型および弱結合型 SOC > 強結合型 SOC の順に既知の有機成分が減少する(腐植化の進行)ことが推察された。一方、 ^{13}C NMR スペクトルは遊離型、団粒内隔離型、弱結合型 SOC 間で類似しており、厩肥施用量や連用年数の影響も認められなかったため、蓄積形態の違いによる化学構造の違いや変化は小さいと考えられた。以上より、29 年の厩肥連用期間中に SOC の蓄積形態の変化は検出されたものの C 蓄積量の安定的な増大をもたらすには至らなかったと推定した。

(3) 土壤中におけるバイオ炭 C の変化

炭化物施用から 5 ないし 6 年後の土壤から重液処理と HF-HCl 処理の組合せによって得られた炭化物量は、宮古島圃場では施用量の 33~37%、大府圃場では 52~89%であった。蓄積形態別に見ると、いずれの土壤でも遊離型 > 結合型であったが、大府では結合型が総収量の 34~36% を占め、施用量の 10~20% がより安定な有機無機複合体を形成したと考えられた。また、宮古島では野菜畑よりサトウキビ畑で結合型炭化物の割合が高く、耕起の有無が有機無機複合体の形成に関与する可能性が示唆された。作土全体と表層の間には収量に差は無く、光分解の影響はなかったと推察された。大府と宮古島の差は、大府土壤に施用された竹炭の方が宮古島土壤

に施用されたバガス炭よりも室内培養実験における分解速度が小さく、X線回折より縮合芳香環含量がより大きいと推定されたことと一致していた。しかしながら、室内培養実験における分解速度がバガス炭と同程度であった木材チップ炭が使われた西多摩圃場では、施用量の46~61%が7年後に遊離型として検出されたため、宮古島土壌からの低い収量には豪雨の発生数の違いなどによる物理的な損失の影響も推察された。BPCA法によるBC含量は、宮古島土壌では遊離型炭化物と結合型炭化物の収量の和とほぼ同じであった。しかしながら、大府土壌ではBC含量の方が有意に低く、西多摩土壌でも遊離型炭化物量を下回ったため、結合型炭化物量を推定することはできなかった。そのため、現在BPCAの収量からBC含量を推定する際に用いる係数に関わる各バイオ炭の硝酸分解に対する応答の差について検討を進めている。

(4) 火山灰の触媒作用による黒色腐植物質の生成

安城Rp型フミン酸と火山灰との混合培養では、添加量の40%以上が無機化し、培養6ヶ月目までは水溶化、その後はアルカリに対する不溶化も進んだため、36ヶ月後のフミン酸画分の収量は添加量の約30%まで減少した。フミン酸画分の黒色度は、石英砂とともに培養した系ではほとんど変化しなかったが、火山灰と培養した系では、全温度で A_{600}/C の増大、60°Cで $\log(A_{400}/A_{600})$ の有意な低下が認められ、火山灰の存在が黒色度の変化に寄与していることが示唆された。しかしながら、60°Cにおいても、36ヶ月後のフミン酸はB型に相当し、黒ボク土で卓越するA型には届かなかった。フミン酸の ^{13}C CP/PASS NMR分析は、培養期間中全温度においてアルキルC含有率が増大し、60°C培養では芳香族C含有率も増大したことを示した。RTO分析に基づく縮合芳香環含量は9.7~18.1 mg g⁻¹で、培養温度が高いほど多く、それぞれ各種土壌のフミン酸と黒色度との関係(Ikeya et al., 2007)から推定される量に匹敵する値を示した。さらに、60°C培養試料と40°Cおよび50°C培養試料の差は、芳香族C量の差以上に大きかったことから、特に60°Cにおいて火山灰の存在がフミン酸の構造変化を促進したと推察された。ただし、分解も進んだことから絶対量として縮合芳香環が増加したかはなお確認が必要である。

ピロガロールの反応では、火山灰または石英砂の添加によりA型フミン酸様物質の生成が確認されたが、反復間の差が大きく、火山灰と石英砂の間に有意な差は見出せなかった。フロログルシノールからは火山灰添加の場合にのみフミン酸様物質が生成したが、収量は低かった。ピロガロール由来フミン酸様物質のRTO分析では、環数3~7の縮合芳香環に由来するBPCAが検出され、特に火山灰添加時に縮合度の大きい芳香環に由来するBPCAの収量が大きい傾向がみられたが、石英砂添加時との間には有意差ではなかった。よって、ポリフェノールから縮合芳香環を含むA型フミン酸様物質の生成が確認されたが、火山灰の効果は証明されなかった。

謝辞

試料採取にご助力いただきました中国浙江省農業科学院 Fu J.博士、Zou P.博士、立命館大学柴田 晃博士、琉球大学小宮康明博士、明星大学吉沢秀治博士、鹿児島大学池永 誠博士、圃場管理をしていただきました名古屋大学田原保樹様に御礼申し上げます。

引用文献

- Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W. 2005: *Org. Geochem.* **36**, 1299–1310.
Ikeya K., Watanabe, A. 2003: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 49, 47–53;
Ikeya K., Yamamoto S., Watanabe A. 2004: *Org. Geochem.*, 35, 583–594;
Ikeya K., Ishida Y., Ohtani H., Yamamoto S., Watanabe A. 2007: *Eur. J. Soil Sci.*, 58, 1050–1061;
熊田恭一 1981: 土壌有機物の化学(第2版), 学会出版センター;
Nakahara, S., Zou, P., Ando, H., Fu, J., Cao, Z., Nakamura, T., Sugiura, Y., and Watanabe, A. 2016: *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*, 121, 67–77;
Shindo H. 1992: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 38, 253–260;
Watanabe A., Ikeya K., Kanazaki Y., Makabe S., Sugiura Y., Shibata A. 2014: *J. Environ. Manage.*, 144, 168–175;
Zou, P., Fu, J., Cao, Z., Ye, J., Yu, Q. 2015: *J. Soils Sediments*, 15, 510–522.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

- 渡邊 彰 2019: 腐植物質の難分解性の鍵構造としての縮合芳香環構造. *Humic Sub. Res.*, 15, 1–10, 査読有.
渡邊 彰 2018: 土壌有機物の性状と蓄積. *ペドロジスト*, 62(2), 53–58, 査読有.

[学会発表](計7件)

- 成瀬 遙・Zou Ping・Fu Jianrong・渡邊 彰 2018: 長期水田利用による土壌有機炭素安定化機構の解析. 日本土壌肥料学会 2018 年度神奈川大会.
渡邊 彰 2018: 土壌有機物の性状と蓄積. 日本ペドロロジー学会, 名古屋.
成瀬 遙・田中峻平・渡邊 彰 2017: 畑土壌中における厩肥有機物の動態. 日本土壌肥料学会 中部支部第 97 回例会.

成瀬 遙・田中峻平・中村 和・渡邊 彰 2017: 厩肥連用畑圃場における土壤有機炭素の経時変化の比重分画を用いた解析. 日本土壤肥料学会 2017 年度仙台大会.

渡邊 彰・中村 和・成瀬 遙・杉浦幸希・阿部倫則 2017: 厩肥または化学肥料連用畑圃場における土壤有機窒素の ^{15}N による動態解析. 日本土壤肥料学会 2017 年度仙台大会.

Watanabe A. 2017: Stability of soil organic matter in soil management for sustainable agriculture. International Symposium on Soil Management for Sustainable Agriculture, Gifu.

渡邊 彰 2016: 土壤有機物の化学構造と動態. 中部土壤肥料研究会 2016 春の講演会, 名古屋.

[図書](計1件)

渡邊 彰・眞家永光 2018: 土の有機物, 土壤サイエンス入門第2版(木村真人・南條正巳編), p. 126-137, 文永堂出版, 東京.

6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

該当なし